

# 自然外力の変化に伴う最近の災害の特徴と 今後の研究開発の展望

杉山 友康\*

## Characteristics of the Recent Disaster Corresponding to Change of Nature and the Prospects of Future Research and Development

Tomoyasu SUGIYAMA

In Japan, the frequency of the concentrated downpour has increased lately, and further there occur large earthquakes frequently. Quite recently, a massive earthquake occurred on 11th March, off the Pacific coast of the Tohoku area, causing devastating damages. On account of such natural disasters, damage scale along railways has become large and its damage modes have been diversifying at the same time. Therefore, at first, this paper explains about circumstances of climate change, and introduces features of natural disasters corresponding to such changes. Moreover, this paper shows the recent state and the future prospects of the research and development in the disaster prevention technological field in Japan.

キーワード：自然災害，豪雨，地震，強風，豪雪

### 1. はじめに

安全でかつ安定した輸送の提供が求められている鉄道は、開業以来自然災害を経験し、これを克服して更なる安全・安定輸送を目指した努力を続けてきた。この成果として、近年の鉄道の災害発生件数は減少している。しかし、本年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、鉄道のみならず社会全般に甚大な被害をもたらした。また、近年の、いわゆるゲリラ豪雨と呼ばれる局地的短時間豪雨の発生頻度の増加や、冬のまれに見る豪雪などにより、かつて経験しなかった形態の災害発生や、最近では経験がなくその対応に追われる様な災害も見られるようになった。本稿では、最近の気象等自然外力の変化状況とこれによる災害の特徴、鉄道総研における防災関連の研究開発の動向について概要を述べた上で、今後の防災に関する研究開発の展望について示す。

### 2. 自然外力の変化

東北地方太平洋沖地震は、マグニチュードM9.0（気象庁発表）という我が国観測史上最大の巨大地震であった。発生が懸念されていた宮城県沖あるいは三陸南部海溝寄りを震源とする地震の30年間の発生確率は、宮城県沖が99%、三陸南部海溝寄りか80~90%であった。両方の地震が連動する場合でもM8.0前後と想定<sup>1)</sup>されていた。今

回の地震のメカニズムや領域、地震規模などの詳細については、今後明らかにされると思われるが、地震に対する備えを行ってきたにも拘わらず、想定マグニチュードを遥かに上回る地震であり、多大な被害をもたらした。

また、地震だけでなく、最近では気象の変化も顕著になってきており、「異常気象」という言葉を耳にする機会が決して珍しいことではない。特に、猛烈な雨量が観測される頻度はここ数年明らかに増加傾向にある。こうした豪雨は、「ゲリラ豪雨」と呼ばれている。そもそも「ゲリラ豪雨」という言葉には明確な定義はないが、極めて小さな空間スケール（数km~数十kmの範囲）で、短時間に観測される雨量強度の極めて大きな降雨を指すと筆者は理解している。図1は、過去30年間および10年毎の短時間豪雨の観測回数を示すもの<sup>2)</sup>であるが、ここ10年については過去と比較して1時間降水量が80mmを超

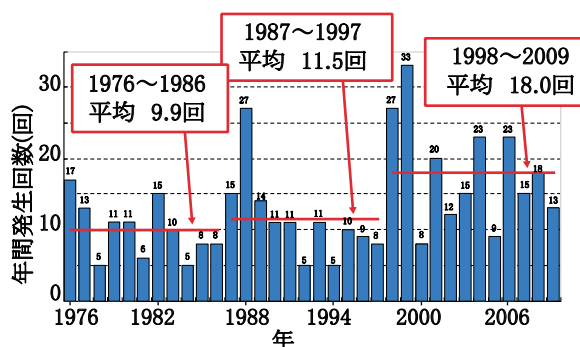


図1 1時間降水量80mm以上の年別発生回数の推移  
(文献<sup>2)</sup>を一部修正)

\* 防災技術研究部 部長

特集：防災技術

える豪雨の観測回数は20年前までの平均値と比較して約2倍となっていることがわかる。また、短時間豪雨だけでなく、梅雨期末期に観測される降雨でも最近では、「観測史上最大の豪雨」と言われるような、累積雨量、時間雨量ともに大きな豪雨が各地で観測される事が多くなっている。図2は日降水量が400mmを超える豪雨の観測回数であるが、これについても20年前までのデータと比較すると約2倍に増加している<sup>2)</sup>。

さらに、2010年末から2011年初めにかけて観測された日本海側の豪雪は記憶に新しい。図3は日本海側の年降雪量の変化<sup>3)</sup>を北日本と東日本に分けて示したものである。北日本における降雪量に大きな変化は見られないが、東日本では1980年代末より極端に減少する傾向が見られる。その一方で東日本の日本海側でも、2006年、2011年には場所により記録的な大雪を記録しており、多くの気象観測点で観測史上1位の積雪深となった。それに伴い、長期的には降雪量が減少傾向を示す地域においても、まれに豪雪となり、雪崩による集落の孤立や人身被害、また大雪による鉄道の運休や道路の通行止めなどの交通障害が多数発生した。降雪量が減少傾向にあるなかでの豪雪は、雪害に対する意識の希薄化に、社会生活、交通輸送環境の変化も加わり、鉄道、道路など交通機関に大きな輸送障害をもたらしたものと想像できる。

ここ数年、各地で突風に起因すると思われる家屋などの被害が多く報じられるようになってきている。特に、昨年は

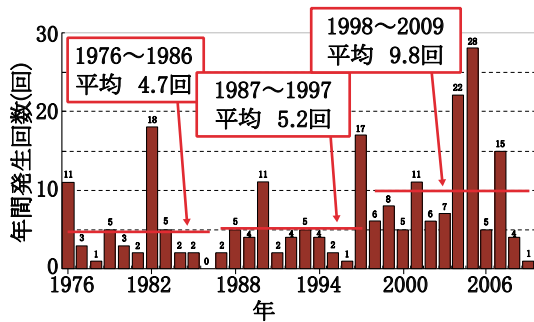


図2 日降水量400mm以上の観測回数の推移 (文献<sup>2)</sup>を一部修正)

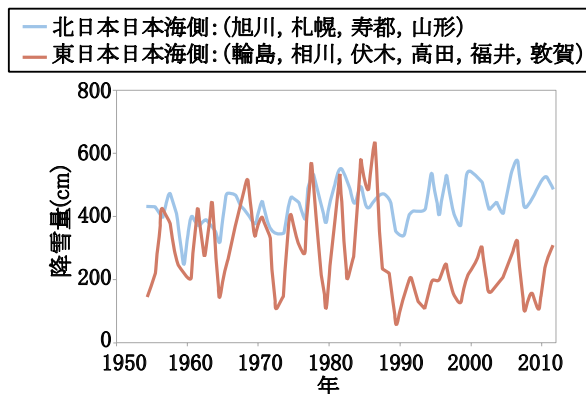


図3 年別降雪量の変化 (文献<sup>3)</sup>に基づき作成)

突風が多く観測された年でもあった。図4は、気象庁が発表している2009年までの「竜巻等の年別発生確認数」<sup>4)</sup>に加えて、2010年の発生確認数(速報値)<sup>4)</sup>を合わせて示したものである。1990年と2006年に突風調査の方法が変更になっているなどの理由から、確認数を単純に比較することはできないものの、従来は1年当たり30件を超えることはなかったが2010年には36件に達した。

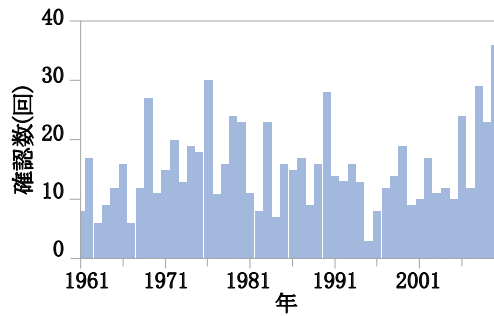


図4 突風の年別確認数(文献<sup>4)</sup>に基づき作成)

3. 最近の災害発生の特徴

図5は、1966年度から2009年度までの国鉄及びJR旅客6社の自然災害発生件数(ただし兵庫県南部地震による件数を除く)を年度別に示したものである<sup>5)</sup>。発生件数は、年度毎の降水量や台風の上陸回数等に左右されて変動がみられるが、確実にしかも大幅に減少してきている。すなわち1960年代には年間6,000件以上発生していた災害が、1970年代には2,000件~3,000件程度に減少し、国鉄からJR会社に移行した1987年以降は、1000件以下にまで減少した。専門的な立場から構造物の健全性を判定する機関(国鉄当時は構造物検査センター、現在では土木技術センターと称する場合もある)を設け、弱点となる箇所を抽出した上で防災対策を行ってきたことによる成果である。一方で、ここ20年間には兵庫県南部地震や新潟県中越地震に代表されるような大きな地震や、強風による列車脱線事故など、大きな被害をもたらすような事象が目立つようになった。こうした災害を経験して、例えば地震については、構造物の耐震強化が進

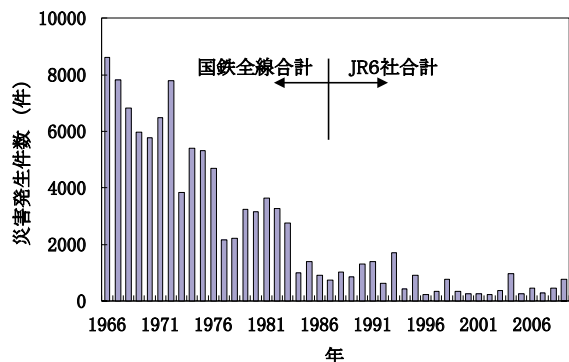


図5 鉄道の自然災害発生件数の推移<sup>5)</sup>

められ、新設構造物の耐震設計法がまとめられるなど鉄道の防災技術も確実な進捗をみている。

2章で示したように近年の気象などの変化に応じて鉄道の被災形態も変化してきている。その代表例として、降雨に起因する災害の特徴を以下に示す。

図5に示した災害の中から、土砂災害に係る災害を抽出し、災害種類別の発生割合の変化を示したものが図6である(文献<sup>5)</sup>を一部修正)。同図左は1995年からの5年間、同図右は近年の5年間におけるものである。両期間を比較すると、発生件数に大きな差がないものの、盛土や切土崩壊などの鉄道施設の被害が減少し、土砂流入・土石流の割合が増加していることがわかる。これは、のり面等への対策が進んだことで鉄道施設そのものの防災強度が相対的に向上した反面、鉄道管理用地外の自然斜面などがそれまでに経験しなかったような短時間の豪雨などによって崩壊し、土砂流入や土石流といった形態の被害となって現れているものと推察できる。

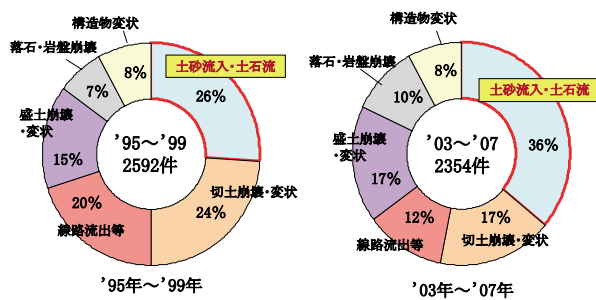


図6 土砂災害の種類別発生割合の変化 (文献<sup>5)</sup>を一部修正)

#### 4. 鉄道総研における自然災害防止に向けた研究開発

鉄道総研では、自然災害に対する鉄道の安全性の向上を目指して、様々な自然外力に対処する方策の研究開発を進めているが、ここではその主なものを自然外力別に整理して紹介する。なお、本文中に(\*)を記した具体的な研究の詳細は、本特集に掲載されているので参照されたい。

##### 4.1 地震災害への対応

早期地震防災システム<sup>6)</sup>は、単独の地震計のP波データ、S波データを処理することにより列車の運転制御を迅速に行うものであり、既に新幹線に導入されている。3月11日の東北地方太平洋沖地震発生の際にも新幹線の運転制御が適確に行われたことでその役割を果たしたものと考えている。特に地震の揺れの推定精度と即時性は新幹線の安全性に直結するため、本システムの導入による減災効果の定量化を進めるとともに、各種推定アルゴリズムの開発・改良、および新規制御方法の検討を現在

実施している。そのひとつとして、P波データを利用した震央距離、震央方位の推定に関しては、従来より短いタイムウィンドウの時間長さをを用いて純粋なP波成分を解析する手法を開発し、推定精度と即時性の向上を確認済みである。また、S波警報に関しては、従来の水平動を対象とした判断指標と、上下動を対象とした判断指標を組み合わせて利用することにより、従来の手法に比べて即時性が向上することを確認した。

一方、規定値を超える地震が発生した場合、現状では沿線に設置された複数の地震計のひとつひとつが受け持つ範囲全線の安全を確認する必要がある。この時、地震計が設置されていない間の揺れの分布を精度良く推定できれば、安全確認をよりの確かつ効率的に実施することが可能となり、状況によっては運転再開の早期化を図ることができる。これを目標とし、線路沿いの地盤と構造物の揺れの強さを、常時微動スペクトルや常時微動のH/Vスペクトルの空間的な比の分布を利用して簡便かつ精度良く推定する手法を検討している。

##### 4.2 強風災害への対応

強風時の安全な列車運行のためには、強風の検知が重要である。そのためには、風速計を線状に長い線路の中で、より強風が観測される地点に設置することが必要となる。そこで、鉄道沿線の地形を考慮した数値シミュレーションと統計的な手法とを組み合わせ、沿線の最大瞬間風速の再現期待値を100mメッシュで求める方法を提案した<sup>7)</sup>。さらに、風速計は適切な位置に設置することが求められるため、風洞試験結果と現地観測結果とから、風速計位置における観測風速を、風に対する車両の転覆耐力を評価する基準位置での風速へ換算するための係数を風速計の高さや風向角別に示した(\*)。これらの成果は、線路構造物周りに風速計を新設あるいは移設をする場合の観測風速の評価に役立つ。

一方、竜巻に代表されるような突風は、沿線の風速計だけでは確実に捉えることができない。鉄道建設・運輸施設整備支援機構の助成を受け、鉄道総研は、気象研究所、J R東日本、京都大学と共同で、小型ドップラーレーダを用いた突風探知のプロトタイプシステムの開発とその性能確認試験を行ってきた。鉄道総研が担当した一つは、地上気象観測網を庄内平野に展開して、そこでの風況と風速変動特性を調べることであった。2冬の観測から、寒冷前線が通過する際に急激な風速増加が短時間に生じて、瞬間風速が25m/s以上に達する場面があることを見いだした。加えて、鉄道の運行管理に資することを目的とした突風探知システムのプロトタイプ(図7)を提案した<sup>8)</sup>が、今後実用化に向けた課題の抽出と解決策を見いだすが必要であると考えている。

特集：防災技術

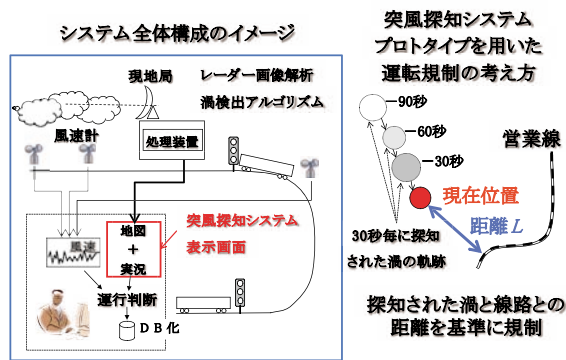


図7 突風探知システムのプロトタイプ

4.3 雪氷災害への対応

積雪寒冷地における列車の走行安全性を確認するため、軌道面に積もった雪が車輪のフランジに踏まれて氷のように硬くなる（フランジウェイ圧雪）現象について、営業線での観測と室内実験から、圧雪の形成条件の解明を進めている<sup>9)</sup>。また、雪崩災害を未然に防ぐためには、事前策としての雪崩危険斜面の抽出、春先の警備実施時期の判断が必要である。この二つについて客観的な判断基準をもとにした危険斜面や警備時期の決定方法を提案した(\*)。また、高速列車に対する車両側の対策として、着雪が生じにくい車体形状の検討を行った。さらに、沿線の気象状況から車体へ附着する雪の量を推定する手法を開発している<sup>10)</sup>。このほか、車両の先頭部に取り付けるスノープラウについて、複数形状の縮尺模型を用いた排雪抵抗確認試験を行ったうえで、側面に雪が堆積していても排雪時の抵抗が増加せず、適正な飛雪分布となる形状を提案した<sup>11)</sup>。

4.4 降雨災害への対応

(1) 斜面災害防止技術

斜面に関わる最近の災害の特徴として、線路から少し離れた箇所を崩壊発生源とする土砂流入や土石流などの発生割合が増加していることは既に述べた。このような線路周辺の斜面の安定性を評価するためには、まず周辺斜面に達した降雨が地盤に浸透し、傾斜方向に流下してやがて地下水位を上昇させる機構を解析することが必要である。さらに、計算された地下水位に基づいて崩壊に対する安定性を評価することが必要となる。そこで、実斜面の地下水計測、模型斜面による散水実験、数値解析等を進め、線路に隣接する斜面の地下水が雨によって時間的・空間的にどのように変化するかを計算し、さらにこの計算結果に基づいて斜面のどの位置がいつの時点で不安定化するかを明らかにする

解析モデルを開発した<sup>12)</sup>。計算された結果の一例を図8に示す。

また、沿線斜面の弱点箇所には必要に応じて防護対策を実施しているが、崩壊危険度のみならず、崩壊による被害程度や線区特性（輸送量など）などを考慮した災害リスク評価を行えば、より効率的な対策順位の決定が可能となる。そこで、沿線での発生頻度が高い、降雨による斜面崩壊と落石による災害を対象として、これらの発生確率や災害発生時の損失からリスクとして災害危険度を評価し、防災計画の意思決定を支援する手法の開発を行った(\*)。

その他既設盛土の降雨対策として、のり面への排水パイプの打設工が定着しているが、打設間隔や打設長などは過去の施工実績に基づくものであった。そこで、実物大模型盛土散水実験、数値解析などを実行して、排水パイプの施工による耐雨効果を定量化し、盛土の立地条件、土質条件などに応じた設計手法の開発を進めている<sup>13)</sup>。

(2) 河川災害防止技術

河川増水時には、橋脚周辺の地盤が洗掘されて橋梁が不安定化する場合があるが、増水時の橋脚の微動から固有振動数あるいは変位量を特定して橋脚の安定度を的確かつ安全にリアルタイムで評価・判定するシステム開発を進めている(\*)。さらに、短時間に局所的集中豪雨が発生する事例の増加により、沿線での被害も斜面崩壊や河川増水による被害に加えて、中小河川の氾濫などに道床バラストの流出、河川の線路横断箇所よる越流など被災形態が多様化している。そこで、こうした局所的短時間集中豪雨が鉄道施設にどのような影響を及ぼすかを評価することを目的として、周辺地形や鉄道施設状態を考慮した周辺中小河川の降雨時挙動を計算するモデルを開発し、そのモデルを用いた氾濫影響評価手法の開発を進めている。

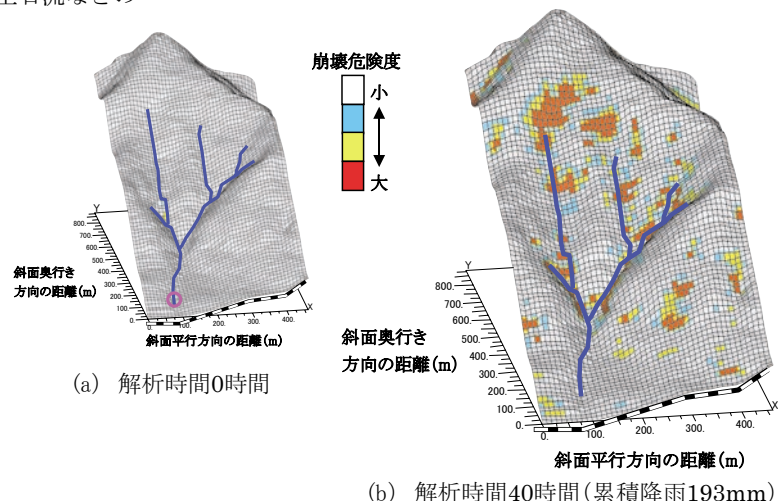


図8 沿線斜面の降雨時危険度評価結果

#### 4.5 落石や施設の劣化など風化に伴う災害への対応

落石については、気象条件との相関が小さいこともあり、落下の危険性を適確に判断することが求められる。斜面上の岩塊の自重と引張強さのつり合いのバランスから落下の可能性を推定する方法と打音測定により危険度を評価する方法を提案した(\*)。また、落下する岩塊の風化程度や重さが斜面上での停止しやすさに影響すること(例えば、斜面の植生占有率が大きいと岩塊が停止しやすいなど)を明らかにした上<sup>14)</sup>で、これらの条件を用いた岩塊の到達範囲の推定方法を検討している。

一方、切土のり面にはコンクリートなどによってのり面を防護している場合があるが、経年により背面地山が風化により土砂化した場合、その風化層によってのり面に徐々に負荷がかかり、やがてのり面工が不安定化することが懸念される。そこで、のり面工背面の風化層を模擬した模型地盤を用いて土圧測定実験を行い、風化層の土圧特性を解明するとともに、切土のり面工の安定性を評価する方法を検討し、地山の風化を考慮した切土のり面工の健全度評価手法として提案した<sup>15)</sup>。

#### 4.6 災害ハザードマップ

数値標高データや衛星画像等の数値情報を用いて鉄道沿線の自然斜面で発生する土砂災害をターゲットにした災害ハザードが可視化でき、かつハザードの影響範囲を解析・評価してマッピングできる手法の開発を進めている<sup>16)</sup>。さらに、近年の気象状況の変化に伴い多様化する災害に対応して、沿線近傍だけでなく広範囲にも視点を向けることの重要性から、風災害、雪害、雨災害など沿線で発生が懸念されるハザードをひとつのマップに展開する「総合的災害ハザードマッピング技術」の構築を目指して、基礎的な検討を始めた(図9)<sup>17)</sup>。

この研究では、これまでに被害を受けたものを災害の対象としてハザードマップに展開できる技術とする予定であるが、これをさらに発展させて気象など外力の変化に応じた被害を予測し、それを含めたマッピングシステ

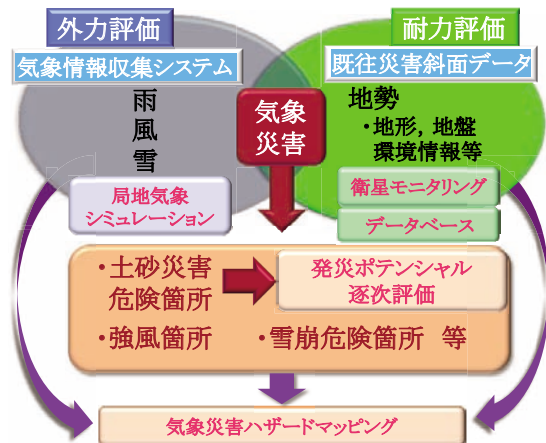


図9 気象災害に対する安全性向上の研究構成<sup>17)</sup>

ムとすることも求められる。さらに、時々刻々変化する気象状況に対応して危険箇所も変化することを考慮したりリアルタイムハザードマップへの展開も必要と考えている。

### 5. 自然災害防止に向けた研究開発の展望

自然災害の防止に向けた技術は、過去の災害を教訓にして発展してきたといえる。しかし、未だに台風や大地震などの自然外力に対しては、鉄道被害を完全に防止できておらず、2章、3章で示したように自然外力そのものが過去と比較して変化しつつあり、それ故に被害形態も多様化する状況にある。今後起こり得る自然外力をどの程度まで想定するかは、極めて難しい課題であるが、ここからは、それらを踏まえた災害防止に向けた研究開発等のあり方を述べる。

#### 5.1 地震災害防止

土木構造物に対する耐震補強対策は、兵庫県南部地震以来、設計外力も見直されると同時に補強方法も確立され、必要な箇所から順次施工されている。このことから、今回の東北地方太平洋沖地震においても新幹線の被害は大きかったものの壊滅的なものとはならず、比較的早期の復旧をみた。しかし、津波により人的被害と同時に鉄道施設も壊滅的な被害を受けたことは周知の通りである。

このように、この地震は、広域にわたる多様な被害をもたらし、鉄道のみならず社会的にも多くの影響を与えた。今後、詳細な被害実態が明らかにされることで、地震動と被害形態との関連のみならず、津波に代表される被害など、地震に付随して発生した被害の子細な分析結果が明らかにされることで、想定外力の見直しとそれに対する防護対策などのハード的な防災対策、被害規模とその影響範囲さらには地震発生時やそれに付随する事象に対する避難誘導などのソフト対策など新たな地震防災対策が鉄道のみならず各分野で必要となるであろう。

#### 5.2 降雨災害防止

降雨による災害の特徴として、鉄道施設の外(管理用地外)を発生源とする被害が増加傾向を示していることは既に述べた。短時間豪雨の頻発によって、これに加えて、鉄道の安全運行に支障する被害も、中小河川の急激な増水や氾濫による鉄道施設の被害、鉄道施設だけでなく線路周辺の排水設備からの溢水による被害、斜面表層部を流下する雨水による崩壊、不安定岩塊周辺の土砂の流出による落石や岩盤崩壊の発生など、これまでに経験しなかった箇所や形態の異なる被害発生が想定される。今後も増加が懸念される短時間豪雨、累積降雨の増加に対して、新たな被害形態を適確に把握する手法、また、これまでの施されてきた降雨対策がどの程度まで効果を発揮する

特集：防災技術

かを正確に評価する手法の開発等を進め、老朽化施設の取替え時期、取替え方法もこれらの状態に即してより効率的に行う方法をハードソフト両面から取り組む必要がある。

5.3 強風・雪氷災害防止

強風災害に対しては、主として列車の脱線転覆防止対策を研究開発の中心として進めてきた。そこでは、「どのような特性を持つ風」を「どのように捉え」、捉えた風が「列車の安全走行にどう影響するか」を一連の問題として扱うことが重要であり、これまでに進めてきた研究開発の成果を今後運転規制の実務にどのように適用していくかなど解決しなければならない難しい課題が残されている。また、強風時には列車の走行安全性に対する課題のみならず、倒木や電車線の被害もあり、外力と耐力をより正確に評価することで、その対応策も見いだすことが期待される。

雪氷災害については、全国的に降雪量が減少してきているとはいえ、今冬期に見られたように、ひとたび豪雪に見舞われた場合、多大な輸送障害が生じることとなり、速度向上、輸送の高密度などの輸送実態の変化に応じた研究開発を進めることが必要であると同時に、新幹線の寒冷多雪地域への延伸に伴って、未だに解明されていない部分の多い、フランジウェイ圧雪の現象解明をはじめとして、新たな雪氷害を想定した適確な防災対策に取り組む必要がある。

5.4 総合的な自然災害の減災に向けて

東北地方太平洋沖地震による被害は、多方面から「想像以上の被害」という言葉で表現されている。自然の外力が大きく変化してきている現状では、想定する外力を大きく見積もれば、それに対する対応も多大なものになることが想像できる。このため、外力とそれによる被害発生との関係を確率的に論じ、さらに被害を定量的に評価することを可能とする災害リスク評価がこれからますます求められることになると考えている。防災技術分野では、防災投資の一助とすることを目的に、斜面災害にリスク評価手法を適用する研究開発を進めたが、外力の変化にも応じたリスク評価に発展させるとともに、こうした手法を他の災害分野にも積極的に展開させることにより、社会的な説明責任を果たしていくことも重要である。

鉄道総研では、こうした研究開発にも積極的に取り組み、自然災害の減災に向けた努力をしたいと考えている。

6. おわりに

昨冬期の山陰地方や北陸地方で観測された豪雪、東北地方太平洋沖地震などは、自然の猛威が凄まじいことを改めて感じさせた。今後変化しつつある自然の外力に対して、その外力と鉄道施設の耐力の両面を精度高く評価し、安全で安定した輸送を確保し、安心して利用できる

鉄道システムのあり方について、できることから一歩ずつ進めることが我々に課せられた大きな課題である。鉄道総研では、これを達成することに向けて決意を新たにしていって邁進するつもりである。

文献

- 1) 地震調査研究推進本部：海溝型地震の長期評価の概要，地震調査研究推進本部ホームページ，2011
- 2) 気象庁：気候変動監視レポート2009 世界と日本の気候変動および温室効果ガスとオゾン層等の状況について，気象庁ホームページ，p30-31，2010
- 3) 気象庁：20世紀の日本の気候，気象庁ホームページ，2002
- 4) 気象庁：竜巻等の突風データベース，気象庁ホームページ
- 5) 太田直之，杉山友康：災害の推移と今後の防災，日本鉄道施設協会誌，Vol.47，No.6，2009.6
- 6) 岩橋寛臣，岩田直泰，佐藤新二，芦谷公俊：早期地震警報システムの実用化，鉄道総研報告，Vol.18，No.9，2004.9
- 7) 荒木啓司，福原隆彰，島村泰介，今井俊昭：数値解析手法を用いた鉄道沿線における強風箇所抽出方法，鉄道総研報告，Vol.24，No.5，2010.5
- 8) 楠研一，今井俊昭，鈴木博人，竹見哲也：小型ドップラー気象レーダーによる鉄道安全運行のための突風探知システムの基礎的研究，鉄道運輸機構基礎的研究制度報告書2010
- 9) 鎌田慈，栗原靖，穴戸真也，高橋大介，飯倉茂弘，小杉健二，望月重人，根本征樹，佐藤威：フランジ通過部に発達する圧雪の形成試験，雪氷研究大会（2010・仙台）講演要旨集，P3-30，2010.10
- 10) 穴戸真也，鎌田慈，栗原靖，高橋大介，遠藤徹，飯倉茂弘，安田馨観，市原良和，横山信行：新幹線車両の着落氷雪予測手法の研究，寒地技術論文・報告集，Vol.25，2009.11
- 11) 鎌田慈，穴戸真也，中嶋大智，中出孝次，栗原靖，高橋大介，遠藤徹，飯倉茂弘：多雪地域対応型スノーブラウ形状の開発，鉄道総研報告，Vol.24，No.5，2010.5
- 12) 布川修，杉山友康，太田直之：地形を考慮した斜面表層部の地下水変動予測と安定性評価，鉄道総研報告，Vol.24，No.5，2010.5
- 13) 太田直之，高馬太一，渡邊諭，杉山友康：盛土に用いる排水パイプの効果の解析的評価，第46回地盤工学研究発表会講演概要集，2011.7
- 14) 長谷川淳，川越健，石原朋和，村中亮太，屋木健司：落石の規模と到達距離に関する検討，日本応用地質学会平成21年度研究発表会講演論文集，p163-164，2009
- 15) 太田直之，高柳剛，杉山友康，興水聡：地山の風化により切土のり面工に作用する土圧の実験的評価，Vol.24，No.5，2010.5
- 16) 長谷川淳，太田岳洋，大神昭徳：数値情報による斜面災害ハザード要因抽出に関する基礎検討，日本応用地質学会平成22年度研究発表会講演論文集，p241-242，2010
- 17) 鈴木康文，渡辺郁夫，石塚弘道，杉山友康，館山勝：鉄道システムの安全性・信頼性向上，p14-17，RRR，2011.1